



東南大學 能源与环境学院
Southeast University School of Energy and Environment

反应堆控制及核电站仪控系统

核工程与核技术本科专业课

陈 达 核科学与技术系

2023年4月6日

本课程教学内容

第一章 绪论（陈达）

第二章 热工对象与PID控制（黄东篱）

第三章1 串级控制系统（黄东篱）

第三章2 导前微分双回路系统（黄东篱）

第三章3 前馈-反馈控制系统（陈达）

第三章4 比值控制系统（陈达）

第三章5 大迟延控制系统（陈达）

第三章6 多变量控制（陈达）

复杂控制系统理论

第四章 蒸汽发生器水位控制系统（陈达）

第五章 稳压器控制系统（陈达）

第六章 反应性控制（黄东篱）

第七章 负荷控制（黄东篱）

反应堆控制系统

第三章 复杂控制系统

3.4 比值控制系统

(对应教材第七章)

3.4.1 比值控制的基本原理

3.4.2 比值控制系统的三种类型

3.4.3 比值控制系统的设计与实施

3.4.4 工程应用实例

3.4.1 比值控制的基本原理

一、什么是比值控制系统？

为什么需要：在各种生产过程中，时常需要保持两种物料成一定的比例关系。一旦比例失调，就会影响生产的正常运行，造成质量降低、产量下降、环境污染，甚至造成安全事故。

- 例如，需要自动保持燃料量和空气量按一定比例混合进入炉膛，才能保持燃在锅炉燃烧过程中燃烧的经济性。

定义：把两个或两个以上参数自动保持一定比例关系的控制系统称为比值控制系统。

二、比值控制系统的工艺参数

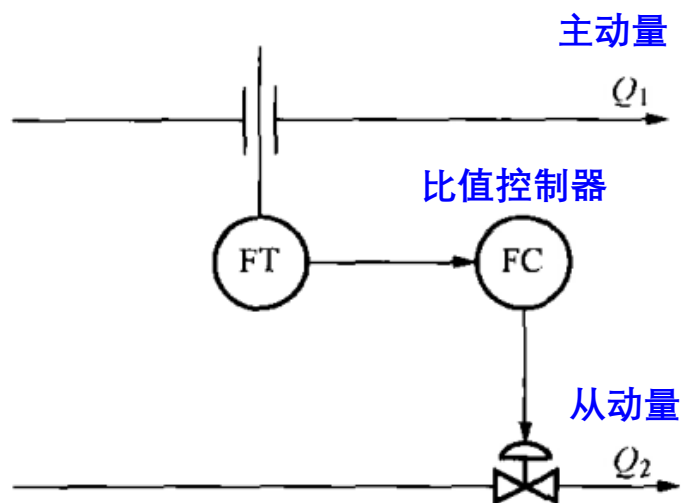
比值控制系统实际上是一个跟踪系统：即使一种物料按比例随另一种物料而变化。在需要保持一定比例关系的两种物料中：

- 处于主导地位的量称为主动量或主物料，用 Q_1 表示，
- 另一种量在控制过程中则跟随主物料的变化而成比例地变化，称为从动量或从物料，用 Q_2 表示。

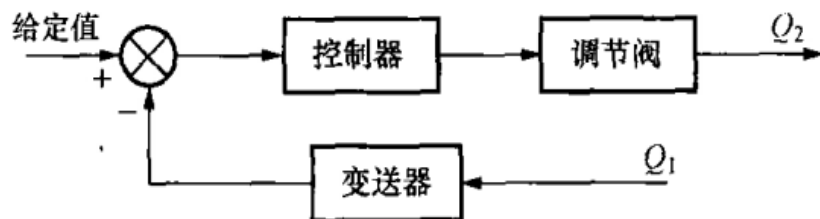
工艺上要求两物料的比值系数为 K ，满足：

$$K = \frac{Q_2}{Q_1}$$

三、比值控制系统的工艺流程与控制框图

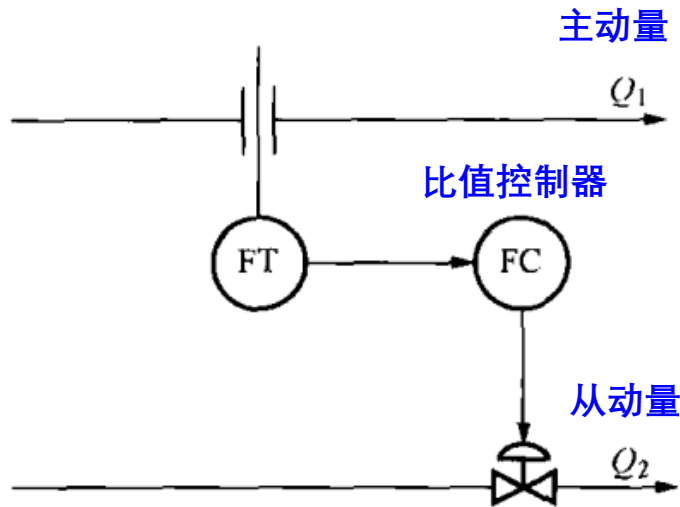


开环比值控制系统



- 从动量 Q_2 以一定的比例随主动量 Q_1 的变化而变化，在**稳定状态**下 $Q_2=K*Q_1$ 。
- 系统中**当 Q_1 受干扰变化**时，控制器接受新的偏差信号，按比例改变调节阀的开度,使 Q_2 按比例变化到某一新的数值。
- 这里的流量控制器应采用比例控制规律即把它作为比值器用。

四、开环比值控制系统存在的问题



因系统内扰，不能控制要求！

开环比值控制系统

在实际生产运行中，即使调节阀没有动作，当从动量通道的压力稍有变化，其流量 Q_2 也要变化，所以两种物料间的比值的实际值较难保持不变，所以开环比值控制在工程上很少应用。

第三章 复杂控制系统

3.4 比值控制系统

(对应教材第七章)

3.4.1 比值控制的基本原理

3.4.2 比值控制系统的三种类型

3.4.3 比值控制系统的设计与实施

3.4.4 工程应用实例

3.4.2 比值控制系统的三种类型

根据不同生产工艺的要求，常用的比值控制系统有：

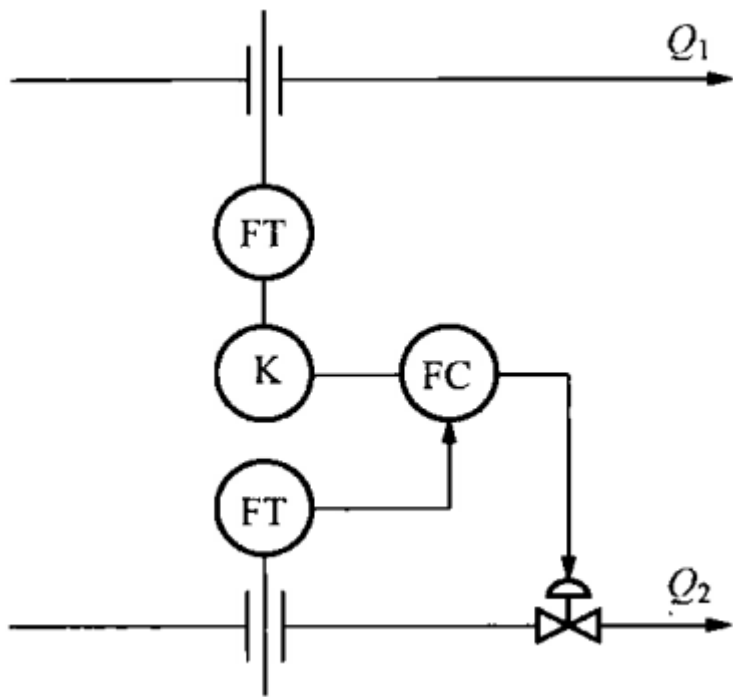
一、单闭环比值控制系统

二、双闭环比值控制系统

三、变比值控制系统

一、单闭环比值控制系统：设计原理

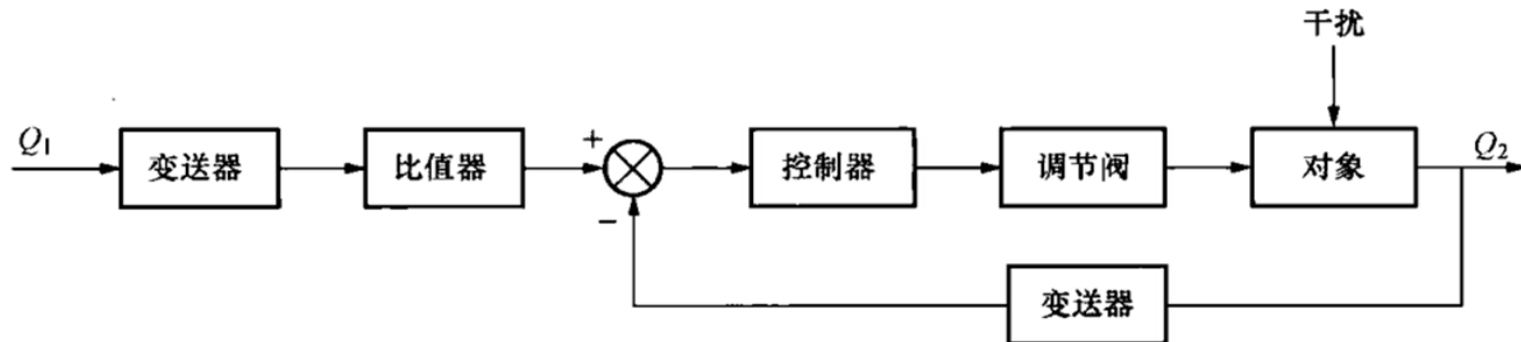
为了克服开环比值控制系统的缺点，在它的基础上，**增加一个从动量的流量闭环控制系统，并且主动量经比值运算后，作为控制器的给定值**，就成为单闭环比值控制系统。



$$Q_2 = K Q_1$$

- 单闭环比值控制系统实际上是一从动量 Q_2 随动于主动量 Q_1 的一个随动系统。
- 他和串级相比有本质差别，主动量是开环，不受控制。

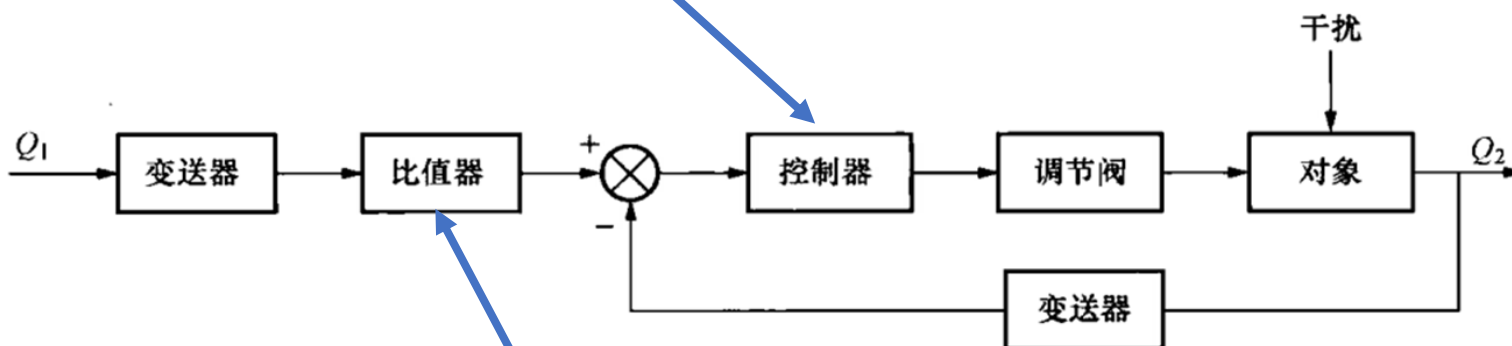
一、单闭环比值控制系统：动态响应过程



- **当主动量不变时**，比值器的输出保持不变，从动量回路是一个定值控制系统。若从动量受到干扰，则通过从动量回路的控制作用，迅速克服干扰，以保持设定的比值关系。
- **当主动量受到干扰发生变化时**，比值器经过比值运算后其输出也相应变化，此时从动量回路是一个随动控制系统，它将使从动量随主动量的变化而成比例变化。
- **若主动量、从动量同时受到干扰而发生变化时**，控制器在克服从动量干扰的同时，又根据新的设定值，改变调节阀的开度，使主、从动量在新的流量值的基础上，保持其原来的比例关系。

一、单闭环比值控制系统：控制器与比值器的选用

从动量闭合回路的任务是快速、精确地随动于主动量变化，因此，控制器应选用比例积分控制规律。



比值器的任务是将主动量按要求乘上一倍数，作为从动量控制器的给定值，采用比例控制规律。

一、单闭环比值控制系统：特点与限制

优点：

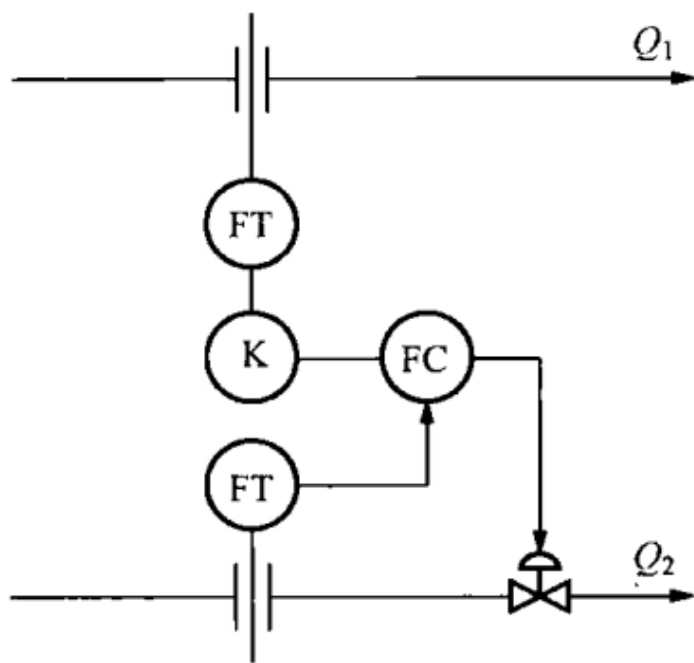
- 不仅能实现从动量跟随主动量的变化而变化；
- 而且可以克服从动量本身干扰对比值的影响；
- 从而实现主、从动量精确的比值控制；
- 系统结构简单、调整方便。

不足之处：

- 主动量不固定，从动量与之成比例，总物料不固定的；
- 这对某些生产工艺是不适当的，比如对于负荷变化大的系统。

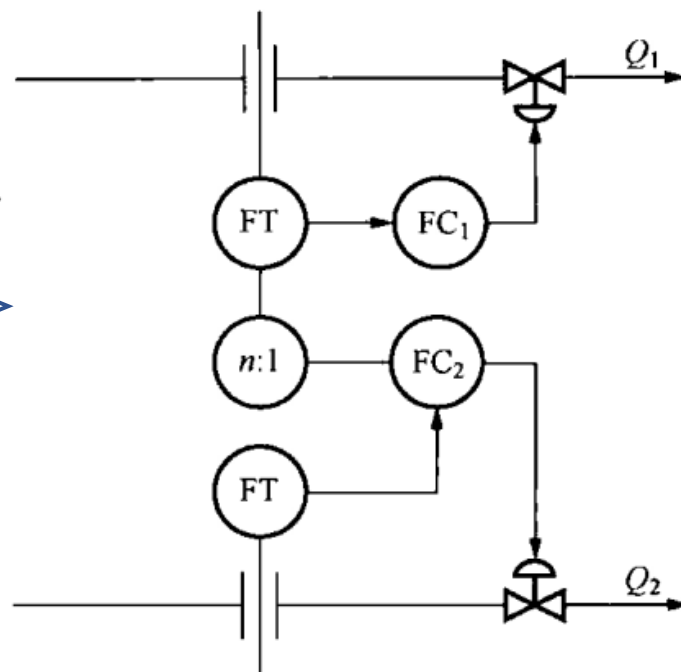
二、双闭环比值控制系统：设计原理

为了克服单闭环比值控制系统主动量不受控制，生产负荷在较大范围内波动：在单闭环比值控制系统的基础上**增加了主动量控制回路**。



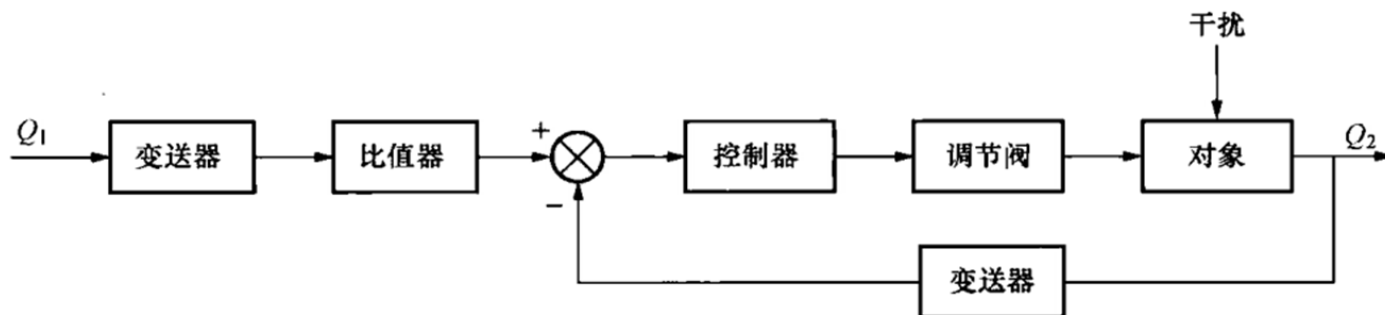
单闭环比值

$$Q_2 = K Q_1$$

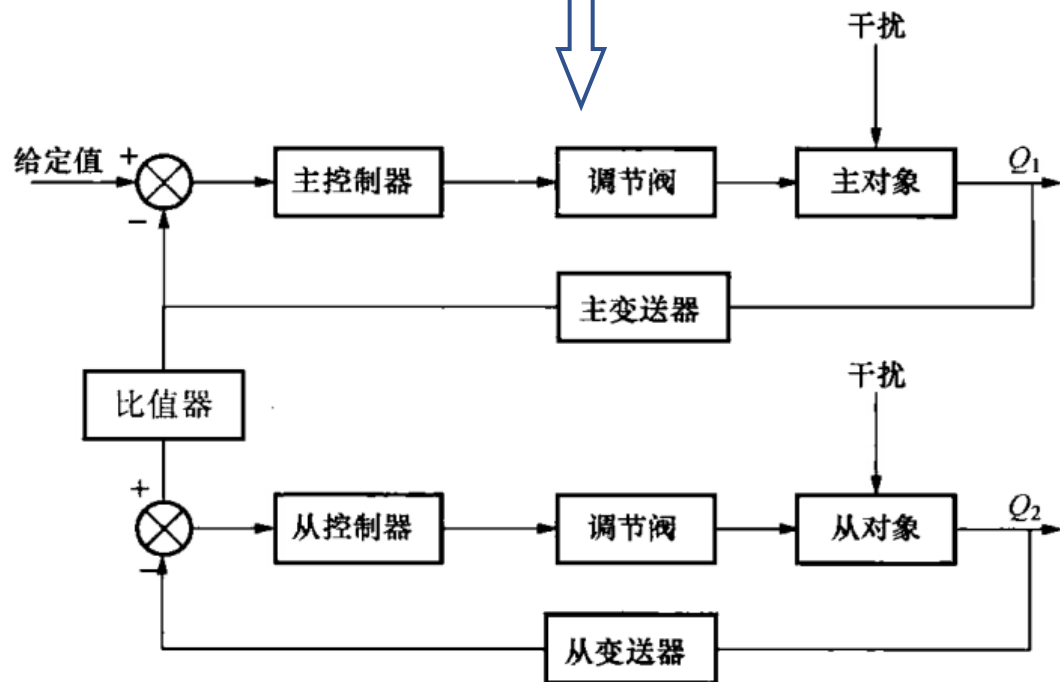


双单闭环比值

二、双闭环比值控制系统：控制框图



增加了主动量控制回路



二、双闭环比值控制系统：控制特性

控制特性：

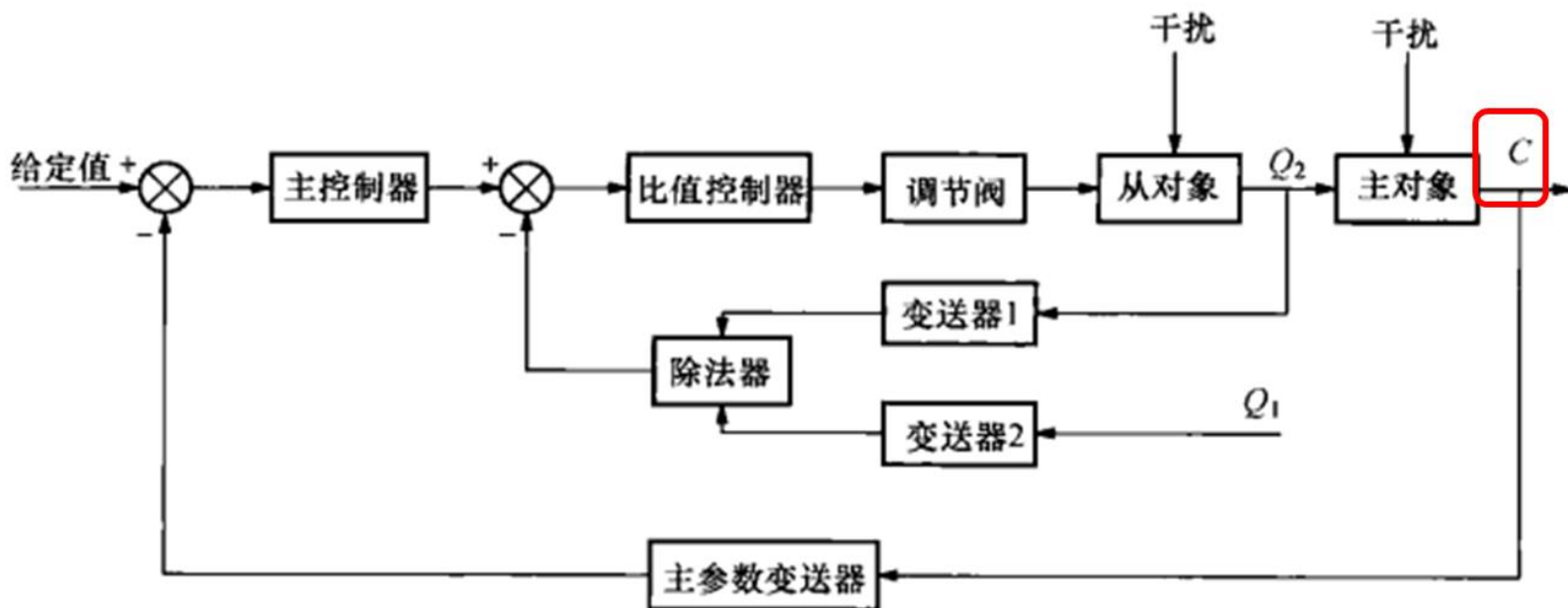
- 当主动量受到干扰发生波动时，主动量回路对其进行定值控制；
- 通过比值控制器从动量也将比较稳定。
- 实现了比较精确的流量比值而且也确保了两个物料总量基本不变。
- 当主动量回路的给定值改变时，不仅主动量要发生变化，从动量也将随主动量成比例地变化。
- 升降负荷方便，只要改变主动量控制器的给定值就可升降主动量。同时，从动量也自动跟踪升降并保持两者比值不变。

这种方案常用于：

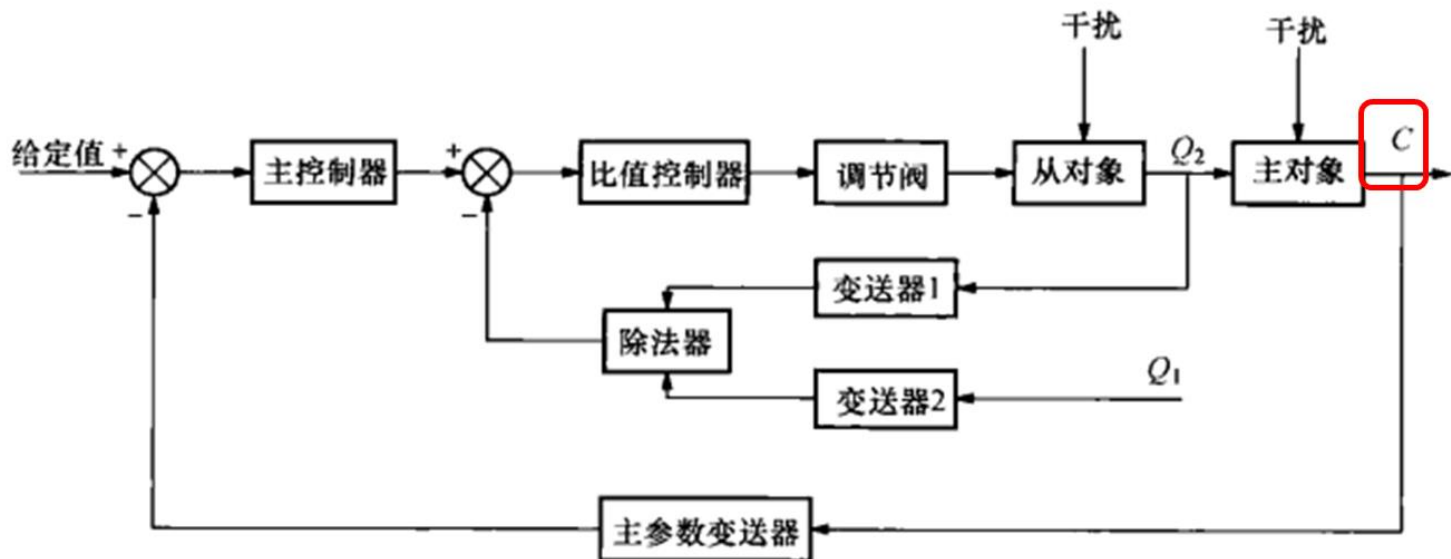
- 主动量干扰比较频繁的场所；
- 工艺上不允许负荷有较大波动；
- 工艺上经常需要升降负荷的场所。

三、变比值控制系统：定义

单闭环或双闭环比值控制系统中，主、从动量之间的比值都是常数。而有些生产过程中，两个动量之比不是一个常数，**需要根据第三参数（或称主参数） C 不断校正比值此即为变比值控制系统**。而主参数 C 往往是生产过程的质量指标。



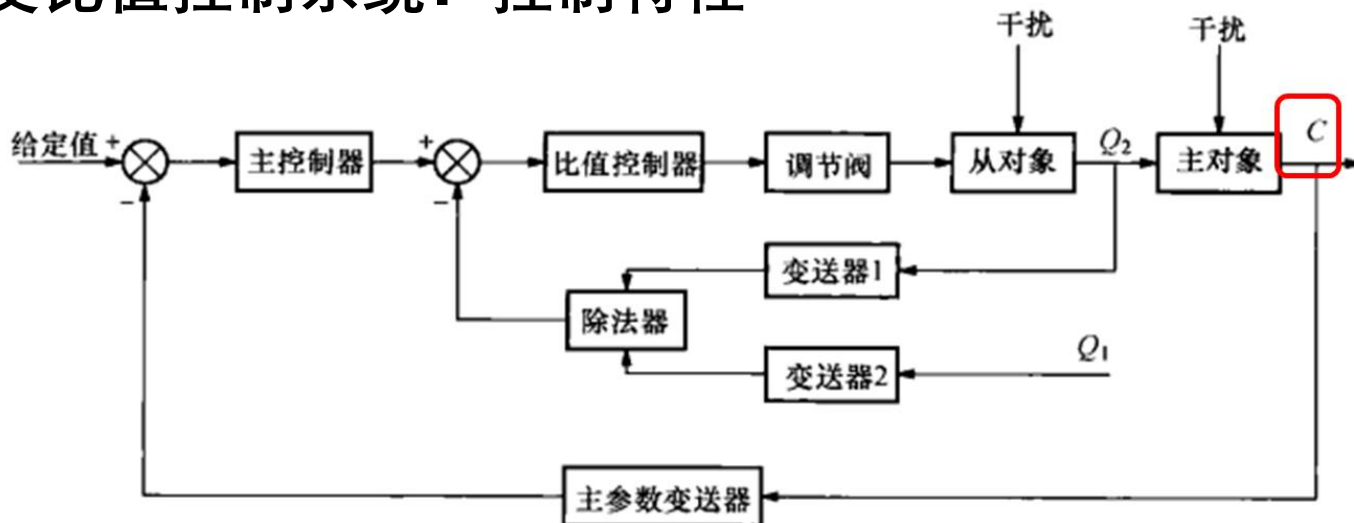
三、变比值控制系统：设计原理



属于前馈—反馈复合调节系统。主被调量 C 为能反映 Q_1 、 Q_2 之间实际比值关系的参数，通常为成分。

- 主控制器：维持 C 为给定值；
- 副调节器（比值控制器）：维持流量 Q_1 、 Q_2 之间为最佳比值。

三、变比值控制系统：控制特性



- 系统稳态时，主、从动量恒定，分别经过变送器后送至除法器，其输出即为比值，同时作为比值控制器的测量信号。
- 当 Q_1 、 Q_2 出现扰动时，通过比值控制回路保证比值一定，在扰动幅值不大时不影响主参数，或**大大减小扰动对主参数C的影响**。
- 当出现除流量扰动外的温度、压力、成分等变化时，使主控制器的输出产生变化，从而修正了比值控制器的给定值，即修正了两个流量的比值，使系统稳定在新的比值上。

小结：

- 单闭环：实现主、从动量精确的比值控制；
- 双闭环：实现了精确比值控制而且确保两个物料总量基本不变。
- 变比值：引入主参数 C ，实现对比值的动态控制。

第三章 复杂控制系统

3.4 比值控制系统

(对应教材第七章)

3.4.1 比值控制的基本原理

3.4.2 比值控制系统的三种类型

3.4.3 比值控制系统的设计与实施

3.4.4 工程应用实例

3.4.3 比值控制系统的设计与实施

- 一、比值控制系统中主、从动量的选择
- 二、比值系数的计算
- 三、非线性测量与开方器
- 四、比值方案选择：比值器、乘法器、除法器
- 五、控制器参数的整定

一、主、从动量的确定与结构方案选择

1. 确定主、从物料流量，其原则是：

- 不可控的为主流量（结构只能选单闭环）；
- 工艺指定：考虑工艺的要求，使主、从动量的确定服从工艺的需要。
- 昂贵的、供应不足的为主流量；
- 小流量为副流量（单闭环时阀门口径小一些）。

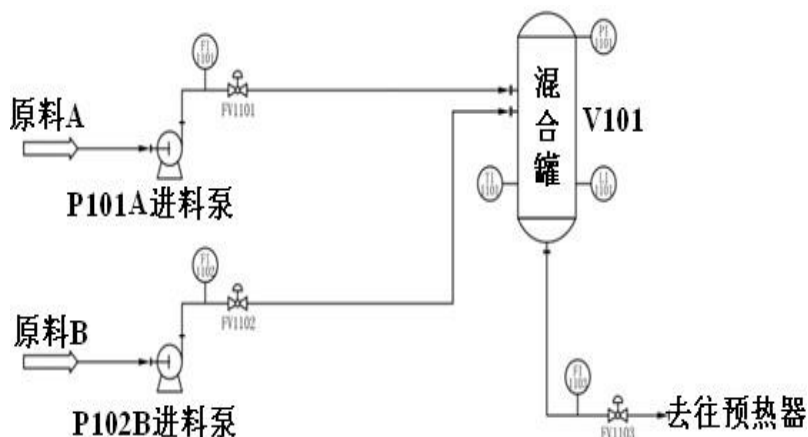
2. 结构方案的选择

定比值：被控参数是比值要求

- 单闭环——对总流量没有要求；如果有一个流量是生产负荷，就只能为单闭环
- 双闭环——对总流量有要求；

变比值：被控参数不是比值，比值只是串级的副参数，比值为不固定。

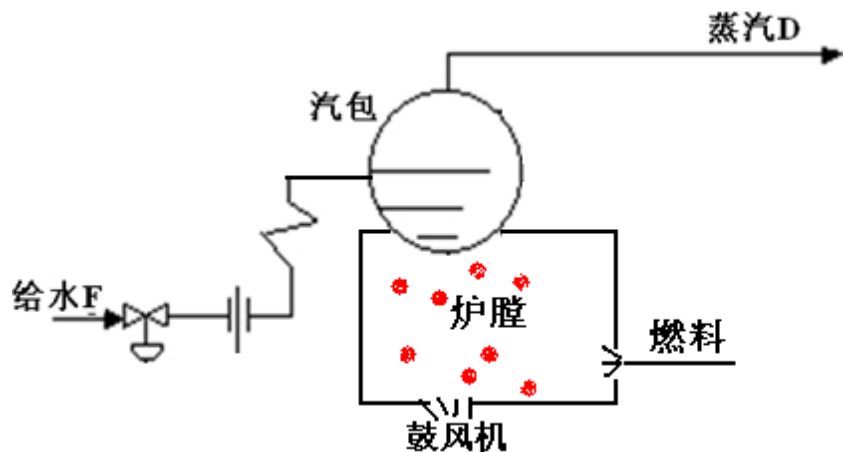
3. 案例分析



利用生产过程中产生的30% NaOH的稀释获得6%的NaOH。

30%NaOH不可任意改变，相当于生产负荷，只能选为主流量。

结构：单闭环比值控制



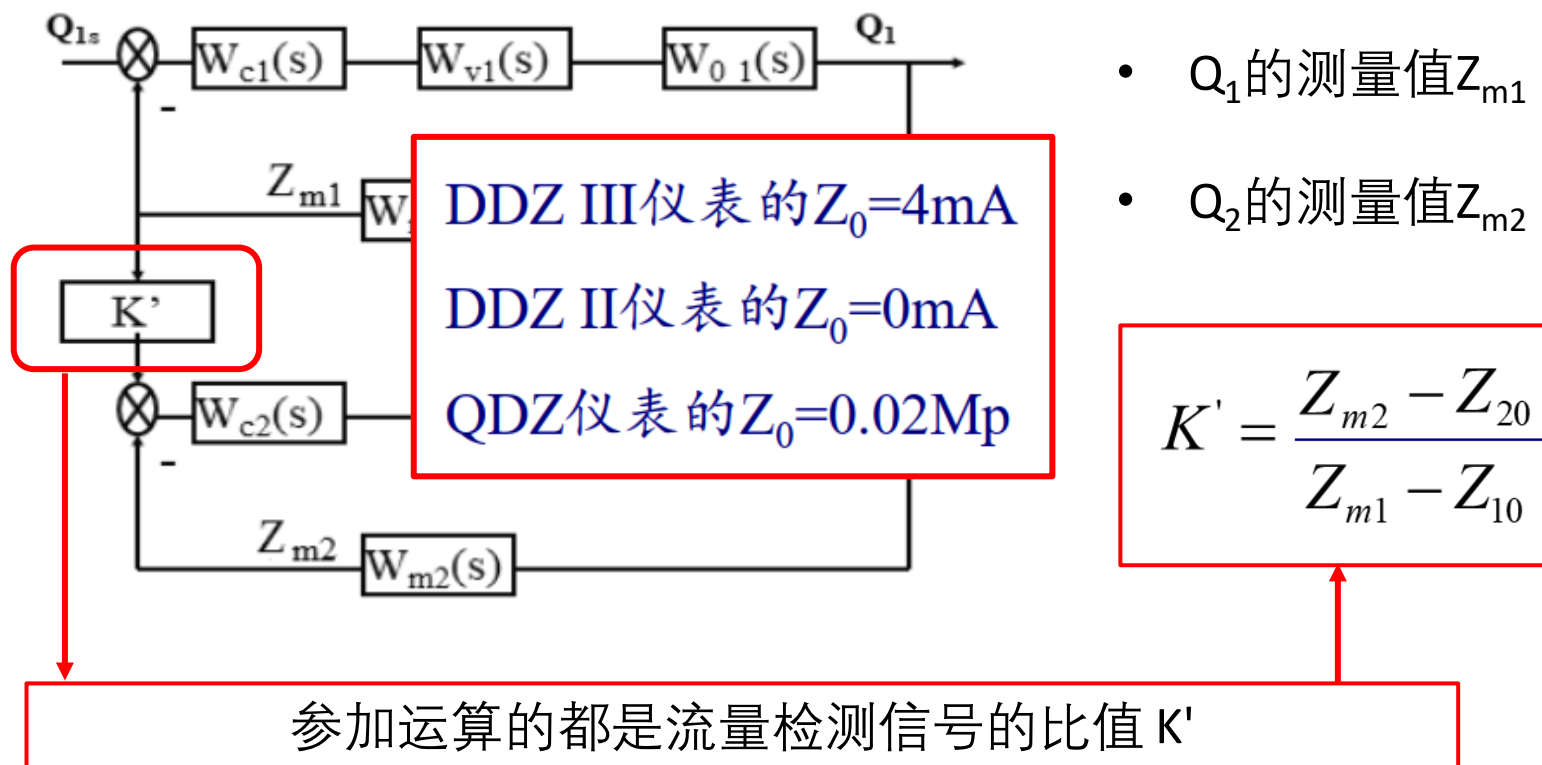
锅炉燃烧要求炉膛氧气含量2%，被控参数：燃料与空气的比值。

燃料阀在蒸汽压力控制回路是控制参数相当于生产负荷，只能选为主流量。

结构：单闭环比值控制。

二、比值系数的计算

- 生产工艺上要求值两种物料的流量比值为： $Q_2 = K Q_1$
- 在控制系统中，必须把流量比值 K 转换为测量信号比值系数 K'



- Q_1 的测量值 Z_{m1}
- Q_2 的测量值 Z_{m2}

二、比值系数的计算

测量方式的选择

线性测量——

- 转子流量计，电磁流量计，
- 测量信号与流量成线性关系

非线性测量——

- 节流元件（差压流量计）方式测量，
- 测量信号与流量成非线性关系

1、流量与测量信号成线性关系

流量检测信号经过开方器后与流量信号成线性关系。

对于DDZ III型仪表：

- 流量 $0 \sim Q_{1\max}$ ，对应测量电流信号：4 ~ 20mA (DC)
- 流量 $0 \sim Q_{2\max}$ ，对应测量电流信号：4 ~ 20mA (DC)

测量信号为电流 I_1

测量信号为电流 I_2

$$\frac{Q_1}{Q_{1\max}} = \frac{I_1 - 4}{20 - 4}$$

$$\frac{Q_2}{Q_{2\max}} = \frac{I_2 - 4}{20 - 4}$$

$$K' = \frac{Z_{m2} - Z_{20}}{Z_{m1} - Z_{10}} = \frac{I_2 - 4}{I_1 - 4} = \frac{Q_2}{Q_1} \cdot \frac{Q_{1\max}}{Q_{2\max}} = K \cdot \frac{Q_{1\max}}{Q_{2\max}}$$



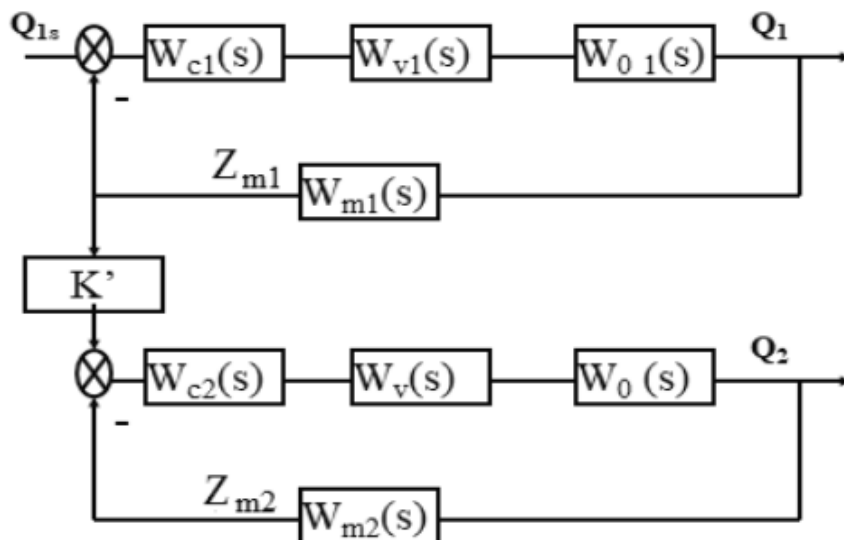
2、流量与测量信号成非线性关系

使用差压式流量计测量流量时，流量与压差的关系为：

$$Q = C \sqrt{\Delta p}$$

其中C为差压式流量计的流量系数。

流量 $0-Q_{\max}$ ，压差信号由0—最大值 Δp_{\max} ， Z_m 为测量值信号



流量与测量信号的对应关系：

$$Q^2 \propto Z_m$$

2、流量与测量信号成非线性关系

对于DDZ III型仪表：

- 流量 $0 \sim Q_{1\max}$ ，对应测量电流信号：4 ~ 20mA (DC)
- 流量 $0 \sim Q_{2\max}$ ，对应测量电流信号：4 ~ 20mA (DC)

$$\frac{Q_1^2}{Q_{1\max}^2} = \frac{I_1 - 4}{20 - 4} \quad \frac{Q_2^2}{Q_{2\max}^2} = \frac{I_2 - 4}{20 - 4}$$

$$K' = \frac{I_2 - 4}{I_1 - 4} = \frac{Q_2^2}{Q_1^2} \cdot \frac{Q_{1\max}^2}{Q_{2\max}^2} = K^2 \cdot \frac{Q_{1\max}^2}{Q_{2\max}^2}$$



比值系数计算的
目的是什么？

流量与测量信号成**线性**关系：

$$K' = K \cdot \frac{Q_{1\max}}{Q_{2\max}}$$

流量与测量信号成**非线性**关系：

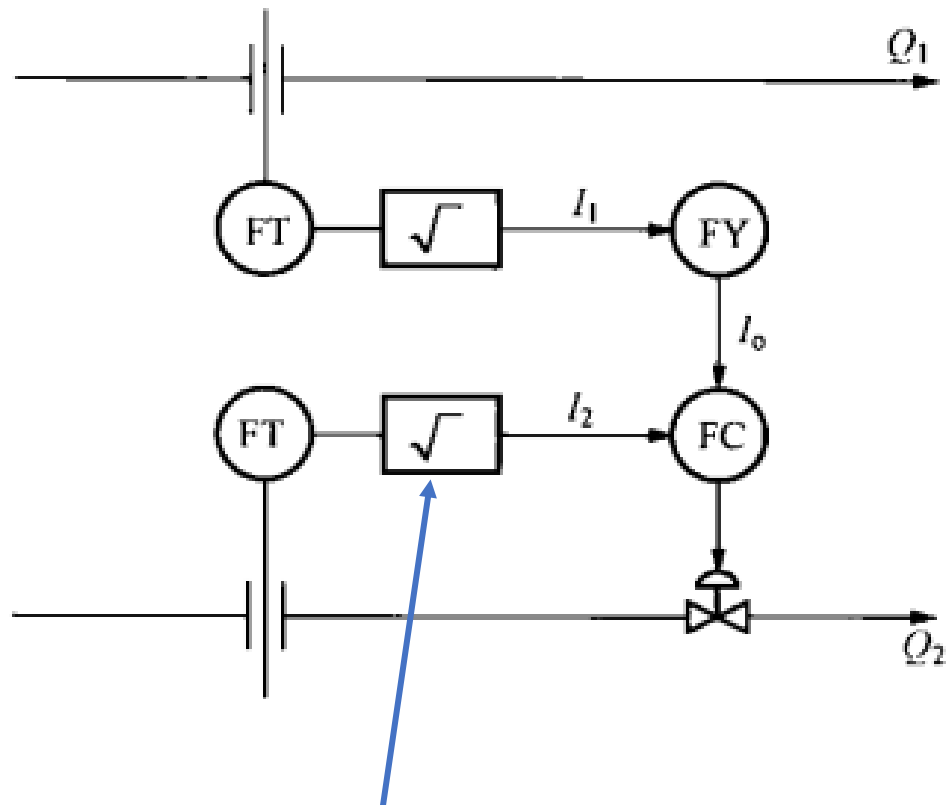
$$K' = \left(K \cdot \frac{Q_{1\max}}{\boxed{Q_{2\max}}} \right)^2$$

系统工艺要求：

$$K = \frac{Q_2}{Q_1}$$

测量仪表的量程

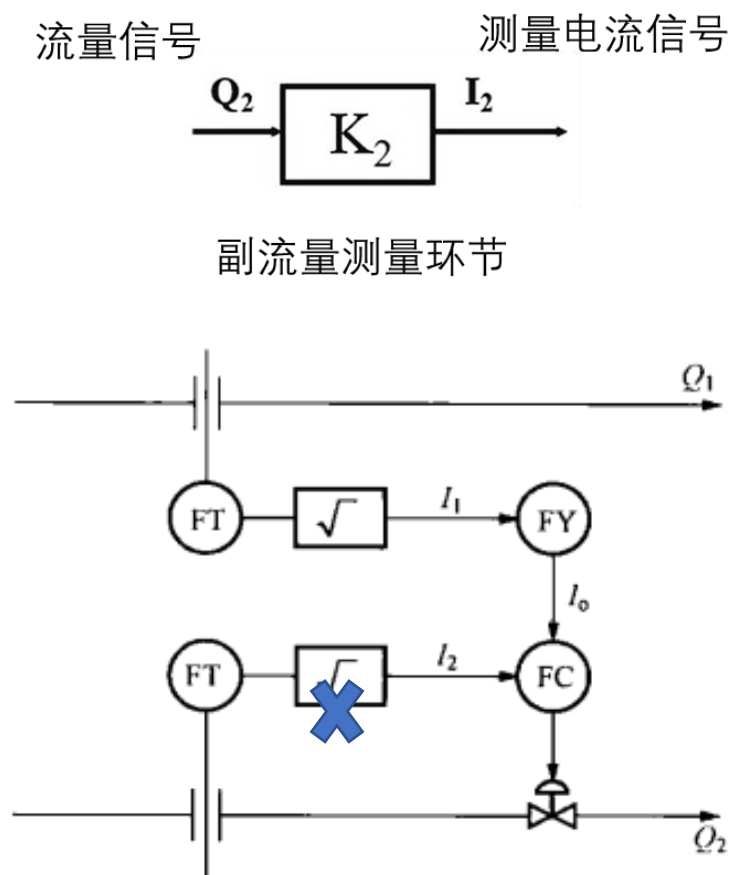
三、非线性测量与开方器



为什么要在系统中引入开方器？

1、非线性测量对系统的影响：

- 在系统中引入非线性环节，使系统具有非线性特性。
- 非线性：是指系统的**静态放大系数**随流量变化而变化的特性



$$\frac{Q_2^2}{Q_{2\max}^2} = \frac{I_2 - 4}{20 - 4}$$

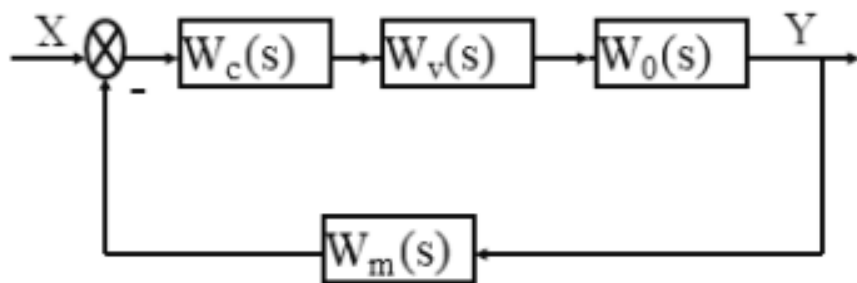
$$I_2 = \frac{Q_2^2}{Q_{2\max}^2} \times 16 + 4$$

静态放大系数：

$$K_2 = \frac{dI_2}{dQ_2} = \frac{32}{Q_{2\max}^2} Q_2$$

K_2 随流量增加而增加

1、非线性测量对系统的影响：

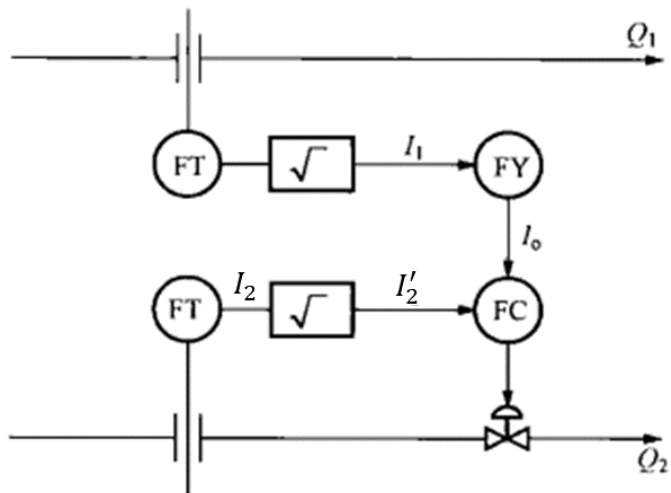


系统的动态控制品质：

超调量和开环放大系数有关

- 当系统是线性时，开环放大系数： $K_0 K_v K_m = \text{常数}$
- 控制器参数整定好滞后： $K_c K_0 K_v K_m = \text{常数}$ ，系统性能不变。
- 当引入非线性测量环节， $K_m \neq \text{常数}$ ，系统放大系数随流量波动
- 当负荷变化很大时，系统性能变差，此时应尽量避免非线性

2、开方器的引入：



加开方器后测量环节放大系数计算：

$$I_2 = \frac{Q_2^2}{Q_{2\max}^2} \times 16 + 4$$

开方器作用：

$$\frac{I'_2 - 4}{20 - 4} = \frac{\sqrt{I_2 - 4}}{\sqrt{20 - 4}}$$

$$I'_2 = \sqrt{I_2 - 4} \times 4 + 4 = \frac{Q_2}{Q_{2\max}} \times 16 + 4$$

引入开方器的原则：

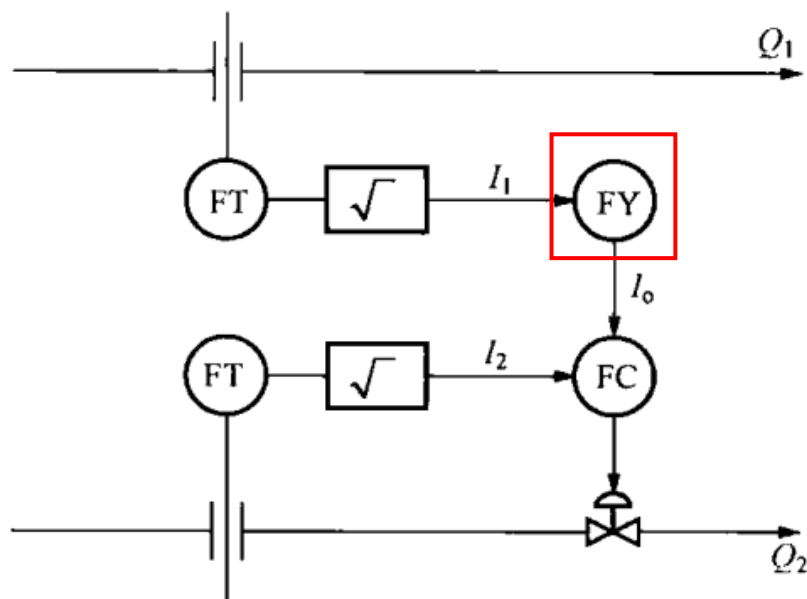
- 系统精度要求很高
- 负荷流量变化很大

$$K'_2 = \frac{dI'_2}{dQ_2} = \frac{16}{Q_{2\max}}$$

不再受流量变化的影响！

四、比值控制系统控制器的选择

1、比值器方案



比值器的输出信号:

$$I_0 = (I_1 - 4)K' + 4(\text{mA})$$

系统稳态时:

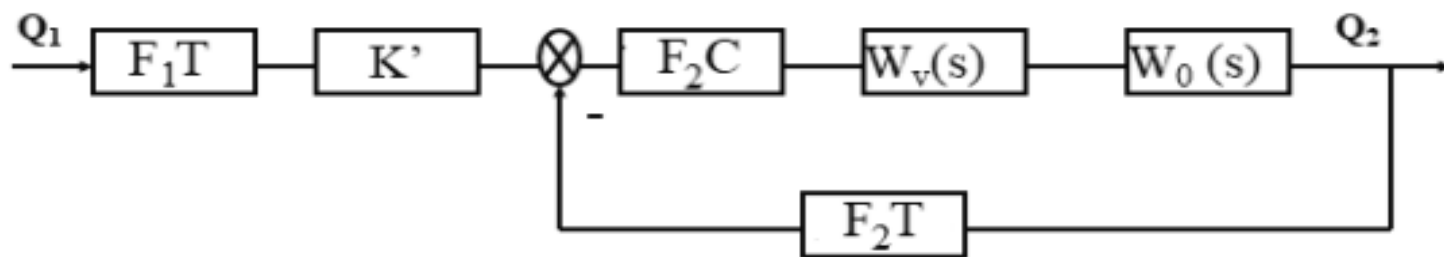
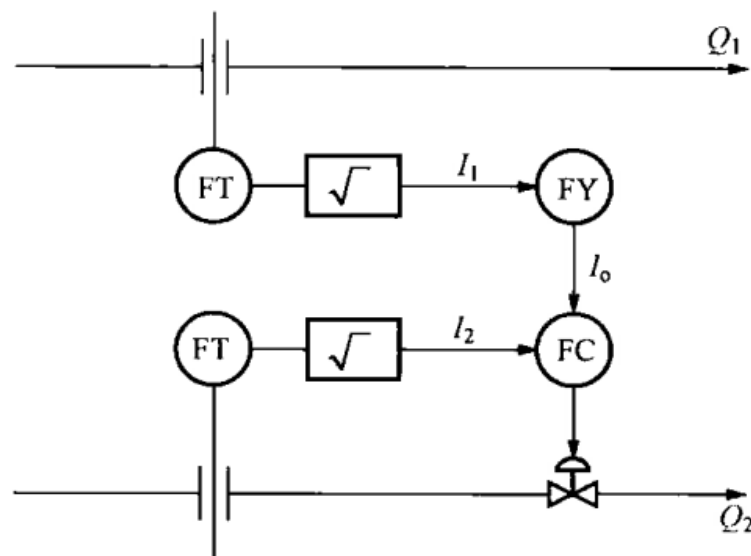
$$I_2 = I_0$$

比值系数为:

$$K' = \frac{I_2 - 4}{I_1 - 4}$$

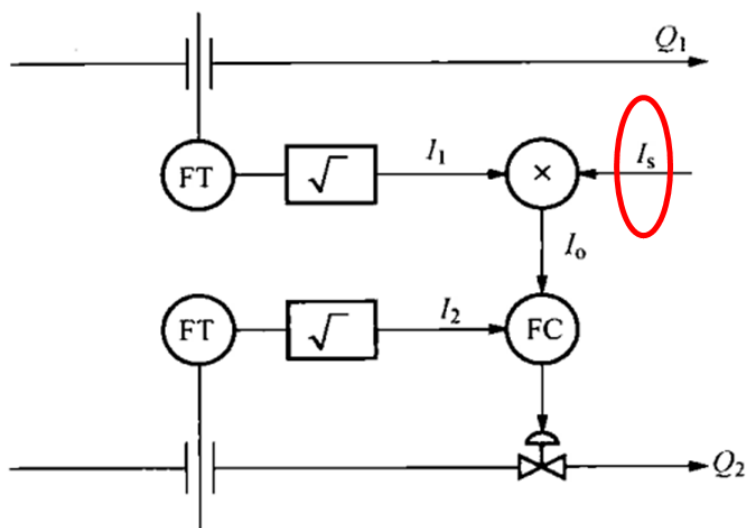
比值器方案的特点

- 比值器线性
- 比值范围广, $K'=0.4 \sim 2.5$
(由组合仪表决定)
- 不能实现变比值
- 不能显示动态比值



2、乘法器方案

主要任务是按照工艺要求的流量比值 K ，正确设置乘法器的给定值 I_s 。



乘法器的输出信号：

$$I_o = \frac{(I_1 - 4)(I_s - 4)}{16} + 4 \text{ (mA)}$$

系统稳态时： $I_2 = I_o$ ， 可得：

$$I_s = \frac{I_2 - 4}{I_1 - 4} \times 16 + 4 = K' \times 16 + 4 \text{ (mA)}$$

测量环节为线性时：

$$I_s = K \frac{Q_{1\max}}{Q_{2\max}} \times 16 + 4 \text{ (mA)}$$

测量环节为非线性（不加开方器）时：

$$I_s = K^2 \frac{Q_{1\max}^2}{Q_{2\max}^2} \times 16 + 4 \text{ (mA)}$$

对于DDZ-III型单元组合式仪表，其输入、输出信号为 4~20mA(DC)，
要使 I_s 在标准信号范围内（ $4mA \leq I_s \leq 20mA$ ）：

$$\begin{array}{ccc} & \boxed{K' \leq 1} & \\ \swarrow & & \nwarrow \\ \boxed{I_s = K \frac{Q_{1\max}}{Q_{2\max}} \times 16 + 4 \text{ (mA)}} & & \boxed{I_s = K^2 \frac{Q_{1\max}^2}{Q_{2\max}^2} \times 16 + 4 \text{ (mA)}} \end{array}$$

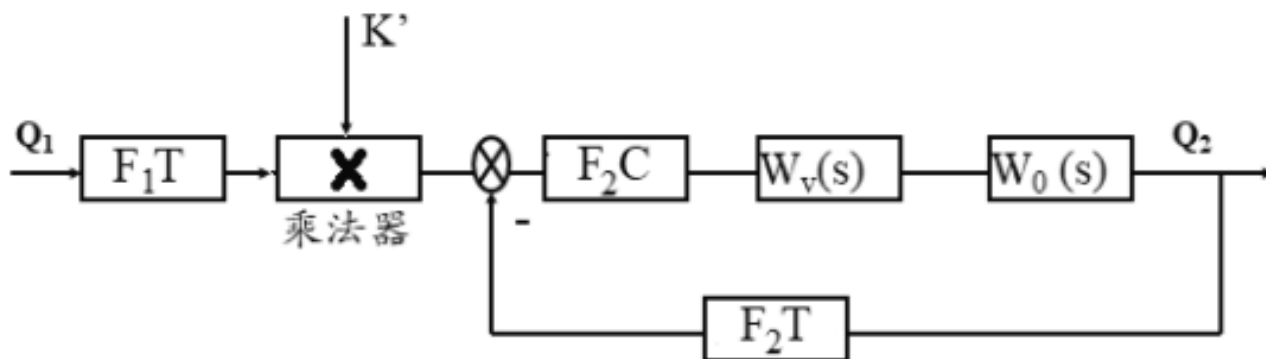
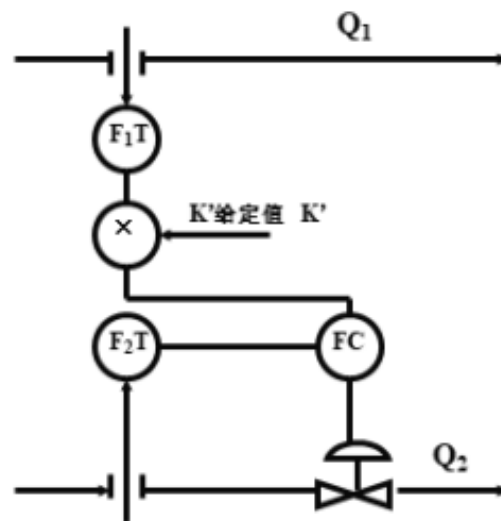
一般K是由工艺过程决定，在选择流量测量仪表的量程时，应满足：

$$\boxed{Q_{2\max} \geq K_{\max} Q_{1\max}}$$

其中， K_{\max} 为工艺过程要求的最大比值。

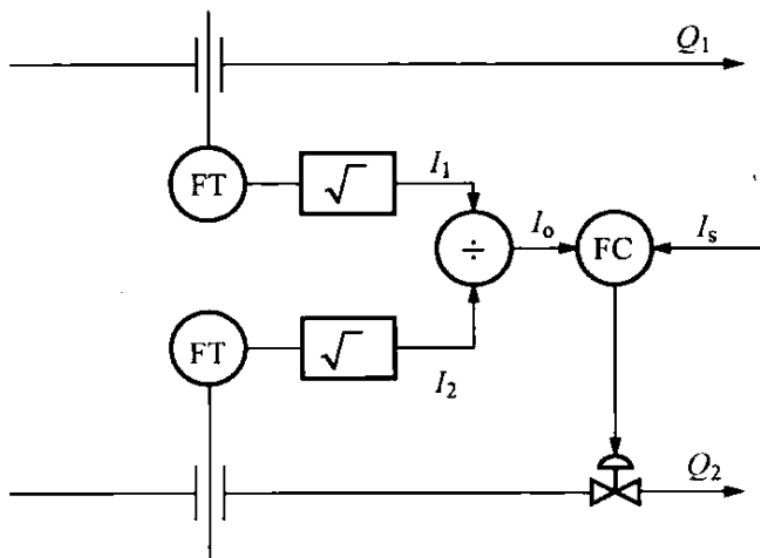
乘法器方案的特点

- 线性，精度高
- 可实现变比值
- $K' \leq 1$ （组合仪表确定）
- 不能显示动态比值



3、除法器方案

主要任务是按照工艺要求的流量比值 K ，正确设置除法器的给定值 I_s 。



除法器的输出信号 I_0 为：

$$I_0 = \frac{I_2 - 4}{I_1 - 4} \times 16 + 4 = K' \times 16 + 4 \text{ (mA)}$$

系统稳态时： $I_0 = I_s$ ， 可得：

$$I_s = K' \times 16 + 4 \text{ (mA)}$$

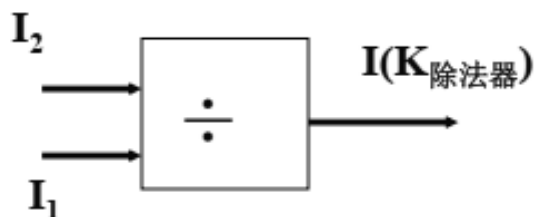
应用除法器方案的单闭环比值控制系统

与乘法器的给定值计算公式相同

除法器的特点与局限性：

- 除法器总是用小信号除以大信号 \rightarrow 随小信号的增大 \rightarrow 除法器的输出也随之增大。当小信号与大信号相等时，除法器的输出达到最大。
- 应用除法器构成比值控制系统时，比值系数不能设置在1附近。在1附近时，系统稳态时除法器的输出就已经最大，如果出现某种干扰使Q2增大或使Q1减时，**除法器进入饱和状态**，输出不再随比值的变化而变化，造成对比值的失控。
- 除法器包括在从动量控制回路中，**除法器的非线性**对控制系统品质将会造成影响。

除法器在从动量控制回路中引入非线性

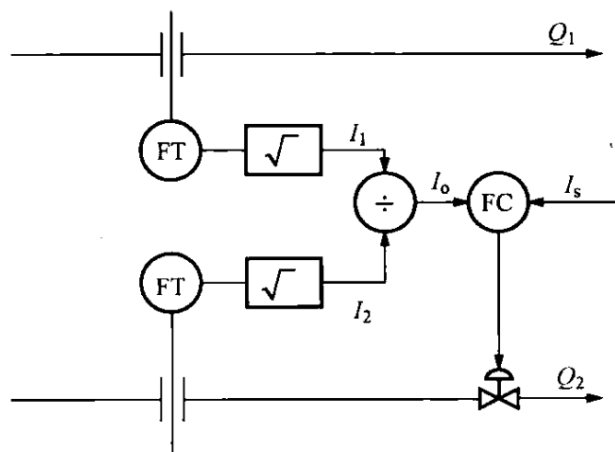


除法器的输出与输入的关系为：

$$I = \frac{I_2 - 4}{I_1 - 4} \times 16 + 4$$

对副流量控制回路而言，**除法器的静态放大系数为：**

$$K_{\text{除法器}} = \frac{dI}{dI_2} = \frac{1}{I_1 - 4} \times 16 = \frac{Q_{1\max}}{Q_1}$$



- 静态放大系数与主动量的流量成反比
- 在从动量反馈回路中引入非线性
- 系统稳定性下降

四、比值控制系统控制器的选择

比值器

- 线性
- 比值范围广,
 $K'=0.4 \sim 2.5$
(由组合仪表决定)
- 不能实现变比值
- 不能显示动态比值

乘法器

- 线性
- 可实现变比值
- $K' \leq 1$ (组合仪表确定)
- 不能显示动态比值

除法器

- 非线性
- 可实现变比值;
- 能显示动态比值;
- $K' < 1$ (组合仪表确定的);

例题： 30%NaOH稀释为6%~8%，经计算要求水的流量 Q_2 和30%NaOH流量 Q_1 的比为 $Q_2/Q_1=4\sim 2.75$ ；已知30%NaOH的正常流量为 $Q_{1n}=700\text{kg/h}$ ，采用孔板测量方式，求 K'

解： 1) 确定仪表量程

$$Q_{1\max} = Q_{1n} / 0.7 = 1000\text{kg/h}$$

$$Q_{2\max} = K_{\max} Q_{1\max} = 4000\text{kg/h}$$

2) 计算比值系数 K'

$$K' = (K \cdot \frac{Q_{1\max}}{Q_{2\max}})^2 = 1 \sim 0.473$$

- 根据额定流量确定仪表量程——应将额定流量处于最大量程的50-70%左右；
- 当一个比值系统的比值是一个范围时，确定 Q_2 的量程时根据最大。

五、比值控制系统控制器的选择与参数整定

1. 控制器的选择：

单闭环或双闭环**从动量回路**——

- 比值控制系统的核心，随动控制
- 要求：快速、正确跟随主流量变化，关注动态比值；
- 采用：PI/PID

双闭环主流量回路——定值，要求不高（工艺上没要求）

- 通常采用P/PI

变比值——实质上是串级控制，参照串级控制调节器选择，

- 比值是副参数，副调节器一般P或减弱积分

五、比值控制系统控制器的选择与参数整定

2. 主动量参数的整定

比值控制系统中的控制器，根据其作用不同，整定参数的方法也有所不同：

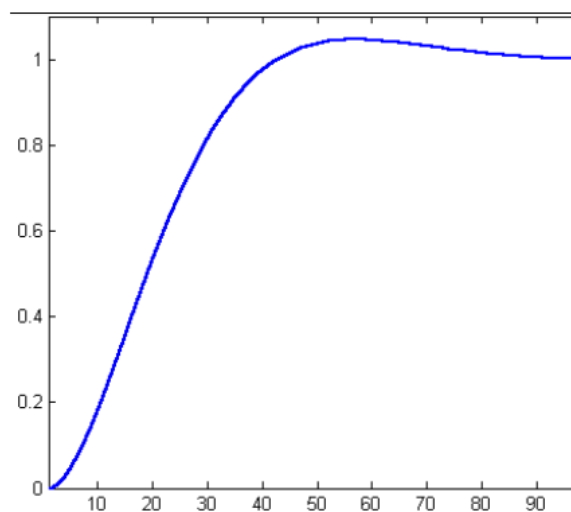
- 双闭环比值控制系统中的**主动量回路**是定值控制系统，可按单回路定值控制系统进行整定。
- 变比值控制系统其结构上是串级控制系统，比值是副参数，**主动量控制器**的参数整定可按串级控制系统进行整定。

3. 从动量回路整定要求

单环比值控制系统、双闭环比值控制系统中的从动量回路，它们都是一个随动控制系统，其基本要求是：从动量能准确地、快速地跟随主动量而变化，并且不宜有超调。

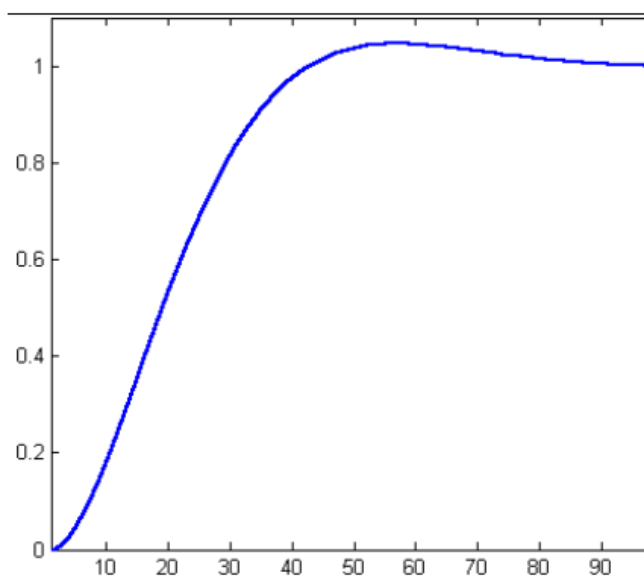
看曲线调参数：

- 这里不要求4:1曲线
- 要求曲线处于振荡与不振荡的临界过程（相当于阻尼比 **0.707**）或临界阻尼



目标：过渡过程既不振荡而反应又快。

4. 单闭环或双闭环从动量回路整定方法



1. 根据工艺要求的两个流量比值 K ，换算出仪表信号比值系数 K' ，按照 K' 投运，并在投运过程中适当调整。
2. 将积分时间置于最大值，由大到小逐步改变比例带，直到在阶跃干扰下过渡过程处于振荡与不振荡的临界过程为止。
3. 如果有积分作用，则在适当放宽比例带 (一般为 20%) 的情况下，逐缓慢地减小积分时间，直到出现振荡与不振荡的临界过程或微振荡过程为止。

比值控制系统的设计与实施小结

1. 主副流量选择
2. 结构选择
3. 比值系数计算
4. 测量方式影响（非线性）
5. 实施方案（非线性，显示动态比值）
6. 控制器参数整定

第三章 复杂控制系统

3.4 比值控制系统

(对应教材第七章)

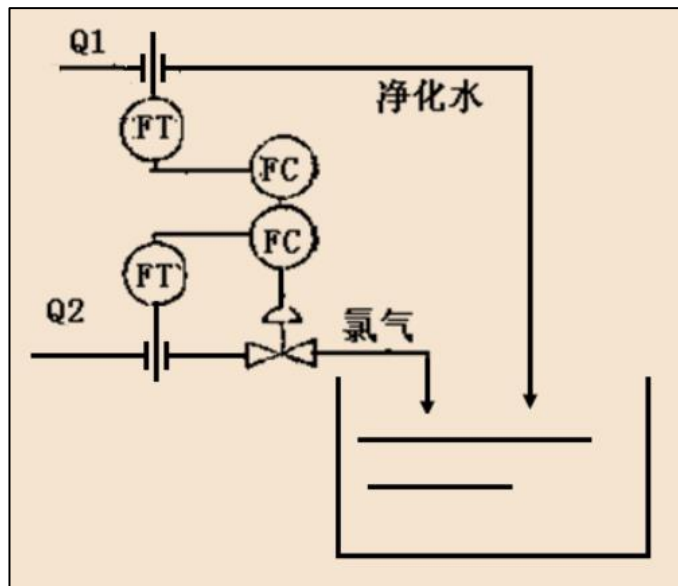
3.4.1 比值控制的基本原理

3.4.2 比值控制系统的三种类型

3.4.3 比值控制系统的设计与实施

3.4.4 工程应用实例

工程应用实例1：自来水消毒控制

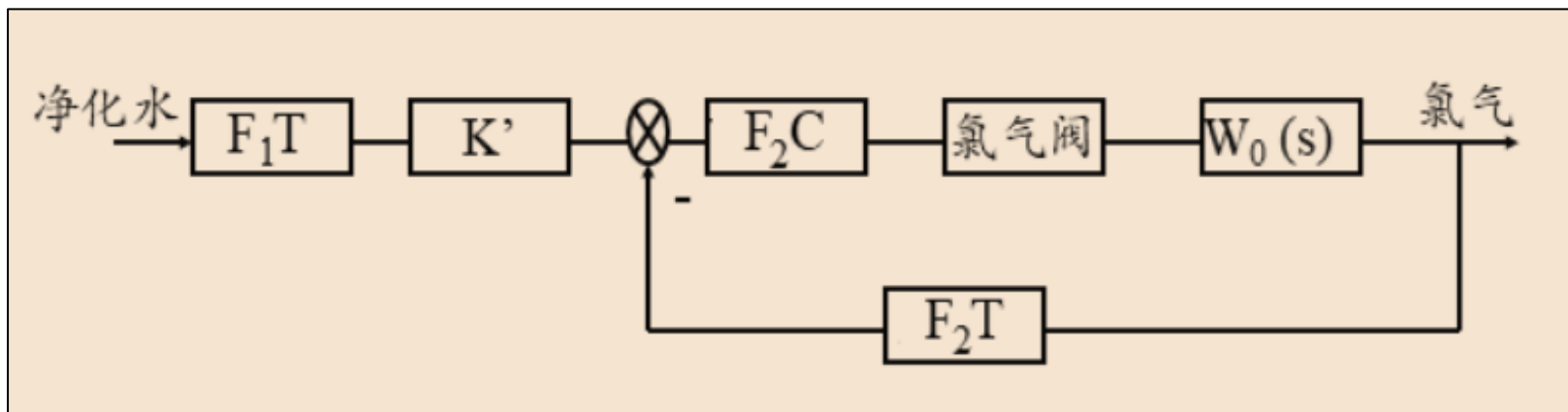


自来水消毒控制系统

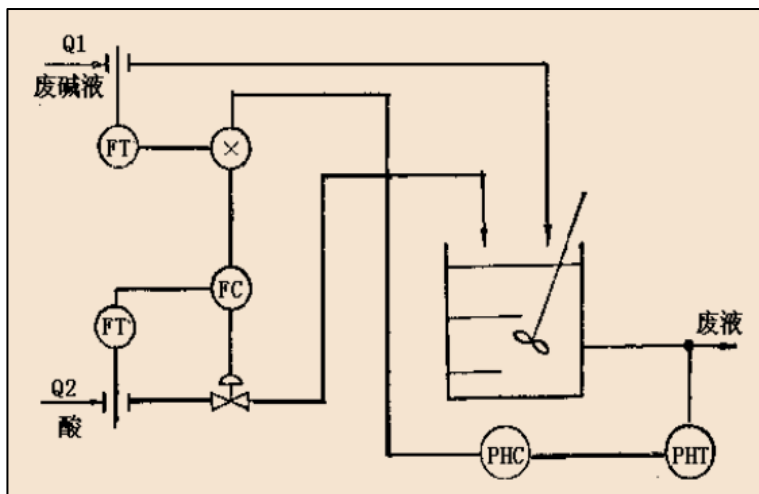
氯气与净化水配比控制

- 主流量：净化水
- 副流量：氯气

单闭环比值控制系统：比值器实施方案（采用的比例控制器）



工程应用实例2：工业生产废液PH控制

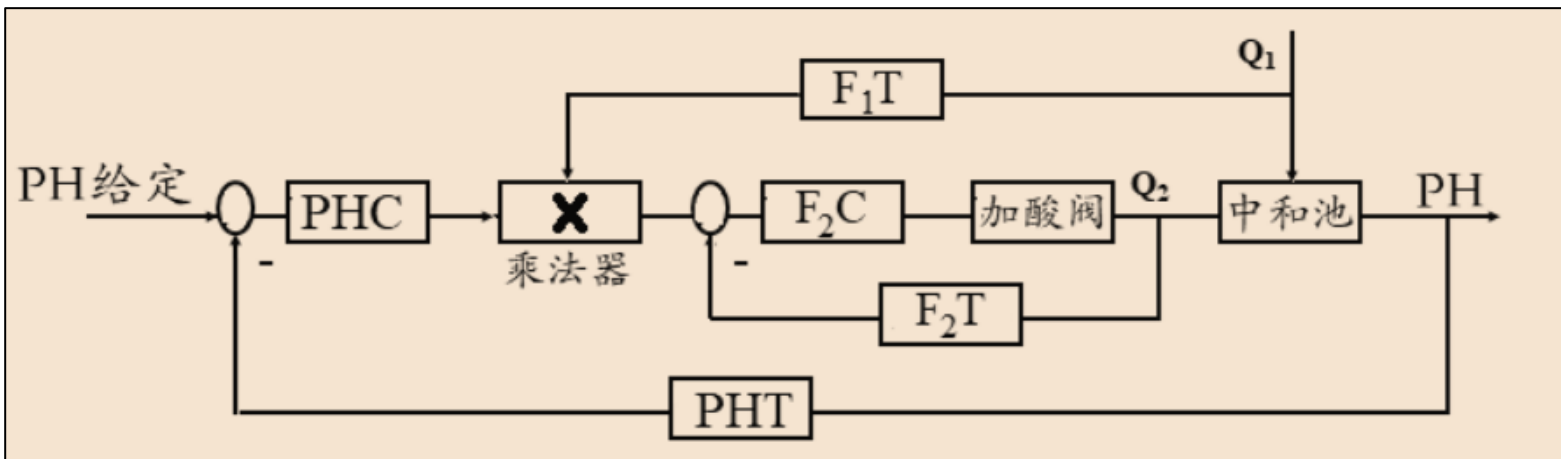


工业生产废液PH控制系统

工业生产废碱液不能直接排放，必须通过加酸中和到PH值为7，才能排放。

- 被控参数： PH值
- 控制参数： 加酸的阀门

用乘法器实现的变比值控制方案



本章思考题：

- 1、比值控制有哪几种结构？单闭环和双闭环选取的主要依据是什么？
- 2、非线性流量测量环节的静态放大系数与哪个因素有关？进行数学推导分析。
- 3、除法器在比值控制系统中应用的优点和缺点有哪些？
- 4、画出串级比值控制的控制框图，说明内外回路的控制目标。

本章结束！